

Science Arts & Métiers (SAM)

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers ParisTech researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <http://sam.ensam.eu>
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/10437>

To cite this version :

Badis HADDAG, Farid ABED-MERAIM, Tudor BALAN - Prédiction de courbes limites de formage avec un modèle élasto-plastique-endommagement et un critère de localisation - In: Colloque National Mécamat, Aussois, France, 2008-01-28 - Colloque National Mécamat, Aussois - 2008

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : archiveouverte@ensam.eu

PREDICTION DE COURBES LIMITES DE FORMAGE AVEC UN MODELE ELASTO-PLASTIQUE-ENDOMMAGEMENT ET UN CRITERE DE LOCALISATION

B. Haddag, F. Abed-Meraim, T. Balan
LPMM-UMR CNRS 7554, ENSAM de Metz
4, rue Augustin Fresnel

57078 Metz Cedex 3

BP 99, 99 000 Ville Cedex 3

Téléphone : 03 87 37 54 30, Télécopie : 03 87 37 42 84

badis.haddag@metz.ensam.fr, farid.abed-meraim@metz.ensam.fr, tudor.balan@metz.ensam.fr

Mots clés : Ecouissage mixte, trajet de déformation, localisation des déformations, endommagement, CLF.

1. INTRODUCTION

La mise en forme de tôles métalliques implique bien souvent de grandes déformations accompagnées de trajets de chargement complexes. Pour améliorer la prédiction via la simulation numérique de la forme finale des pièces, des modèles de comportement plus physiques doivent être considérés. On se propose ici d'étudier la localisation des déformations durant la mise en forme de tôles d'acier à haute résistance. Plus précisément, on aborde la prédiction des courbes limites de formage (CLF) de ces tôles en trajets directs et séquentiels.

Généralement, une bonne prédiction de la localisation des déformations nécessite la prise en compte de l'endommagement dans le modèle de comportement. Ainsi, un modèle de comportement élasto-plastique couplé à un modèle d'endommagement a été considéré. Le couplage est réalisé dans le cadre de l'approche de la mécanique de l'endommagement continu (Lemaitre et Chaboche, 1986). L'écouissage du matériau est pris en compte en introduisant le modèle microstructural de Teodosiu et Hu (1998). Ce modèle permet de tenir compte des phénomènes de changement de trajets de déformation induits lors de la mise en forme des tôles. Dans le but de définir des points limites associés à la localisation de la déformation et qui représenteront les points de la CLF, un critère de localisation est également introduit (critère de Rice, 1976). Le modèle de comportement résultant, combiné au critère de localisation, a été implanté dans le code de calcul par éléments finis Abaqus/Standard en utilisant la routine UMAT pour le comportement et la routine UVARM pour le critère.

Comme application, des simulations de tests rhéologiques avec des chargements directs et séquentiels ont été réalisées afin de montrer simultanément les phénomènes de transition liés au changement de trajets de déformation et ceux relatifs à l'endommagement. Enfin, des CLF à localisation ont été tracées pour différents trajets de déformation.

2. EQUATIONS DU MODELE DE COMPORTEMENT

Le comportement considéré est indépendant du temps physique, avec élasticité isotrope, plasticité anisotrope et endommagement scalaire et isotrope. Plus précisément, le modèle d'écouissage de Teodosiu et Hu (1997, 1998) a été couplé au le modèle d'endommagement scalaire de Lemaitre (1986). Le couplage est réalisé suivant le concept de contrainte effective, définie comme suit :

$$\tilde{\boldsymbol{\sigma}} = \boldsymbol{\sigma} / (1 - d) = \mathbf{C} : \boldsymbol{\varepsilon}^e = \mathbf{C} : (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}^p) \quad (1)$$

associé au principe d'équivalence en déformation (Lemaitre et Chaboche, 1986). Dans l'équation (1) d est la variable d'endommagement continu ($d \in [0,1]$, avec $d = 0$ pour un matériau vierge et $d = 1$ pour un matériau totalement endommagé), $\boldsymbol{\sigma}$ est la contrainte de Cauchy, $\tilde{\boldsymbol{\sigma}}$ est la contrainte dans le matériau vierge équivalent.

2.1 Equations de base du modèle couplé

L'ensemble des équations de base du modèle est donné ici sous une forme compacte :

La loi d'élasticité – affectée par l'endommagement – est donnée par

$$\boldsymbol{\sigma} = (1 - d) \mathbf{C} : \boldsymbol{\varepsilon}^e = (1 - d) \mathbf{C} : (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}^p) \quad (2)$$

Utilisée sous la forme différentielle suivante :

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}} = (1 - d) \mathbf{C} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^e - \dot{d} \mathbf{C} : \boldsymbol{\varepsilon}^e = (1 - d) \mathbf{C} : (\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} - \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p) - \dot{d} \tilde{\boldsymbol{\sigma}} \quad (3)$$

Pour la plasticité, l'évolution de la déformation plastique est définie par la loi associée

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} = \dot{\lambda} \tilde{\mathbf{V}} \quad (4)$$

où le potentiel F est donné par le critère de plasticité de Hill 48 écrit comme suit :

$$F = \tilde{\sigma} (\tilde{\boldsymbol{\sigma}}' - \mathbf{X}) - Y \leq 0 \quad (5)$$

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{(\tilde{\boldsymbol{\sigma}}' - \mathbf{X}) : \mathbf{M} : (\tilde{\boldsymbol{\sigma}}' - \mathbf{X})} \quad (6)$$

Pour l'écrouissage du matériau, l'ensemble des équations du modèle microstructural de Teodosiu et Hu couplées à l'endommagement est donné ici de façon succincte (pour plus de détails, se référer à Teodosiu et Hu, 1998) :

$$Y = Y_0 + R + f |S| \quad (7)$$

$$\dot{R} = C_R (R_{sat} - R) \dot{\lambda} \quad (8)$$

$$\dot{\mathbf{X}} = C_X (X_{sat} \tilde{\mathbf{n}} - \mathbf{X}) \dot{\lambda} \quad (9)$$

$$\dot{S}_D = C_{SD} [g(S_{sat} - S_D) - h S_D] \dot{\lambda} \quad (10)$$

$$\dot{\mathbf{S}}_L = -C_{SL} \left(\frac{|\mathbf{S}_L|}{S_{sat}} \right)^{n_L} \mathbf{S}_L \dot{\lambda} \quad (11)$$

$$\dot{\mathbf{P}} = C_P (\tilde{\mathbf{N}} - \mathbf{P}) \dot{\lambda} \quad (12)$$

$$\mathbf{S} = S_D \tilde{\mathbf{N}} \otimes \tilde{\mathbf{N}} + \mathbf{S}_L \quad (13)$$

$$S_D = \tilde{\mathbf{N}} : \mathbf{S} : \tilde{\mathbf{N}}, \quad \mathbf{S}_L = \mathbf{S} - S_D \tilde{\mathbf{N}} \otimes \tilde{\mathbf{N}} \quad (14)$$

où \mathbf{X} est la contrainte de rappel liée à l'écrouissage cinématique et R est associé à l'écrouissage isotrope ; le tenseur \mathbf{S} d'ordre 4 est lié à la résistance directionnelle des structures de dislocations planaires persistantes et \mathbf{P} est lié à leur polarité.

Pour ce qui est de l'endommagement, la loi classique de Lemaitre, sous sa version modifiée dans la thèse de Khelifa (2004), a été introduite dans le modèle couplé :

$$\dot{d} = \begin{cases} \frac{1}{(1-d)^\beta} \left(\frac{Y^e - Y_i^e}{S} \right)^s \dot{\lambda} & \text{si } Y^e \geq Y_i^e \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (15)$$

qui fait intervenir quatre paramètres matériau, voir Haddag et al. (2007) pour plus de détails.

2.2 Critère de localisation

Plusieurs critères ont été développés dans la littérature pour définir une certaine limite de formabilité des tôles métalliques. L'un des critères les plus populaires est celui de Marciniak-Kuczynski. Le critère utilisé dans cette étude est celui de Rice (Rudnicki et Rice, 1975; Rice, 1976). Ce dernier critère permet, outre la prédiction d'une certaine limite de ductilité, de donner l'orientation des bandes de localisations.

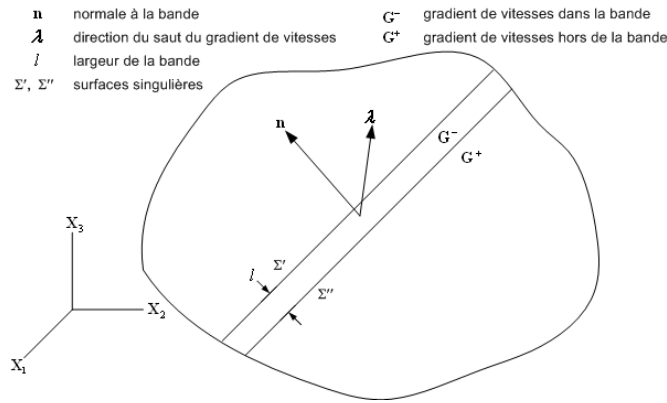


Figure 1. Schématisation du problème de localisation.

Le critère s'exprime comme suit :

$$\det \{ \mathbf{n} \cdot \mathbf{L} \cdot \mathbf{n} \} = 0 \quad (16)$$

où \mathbf{n} est la normale à la bande de localisation (Figure 1) et \mathbf{L} est le module tangent analytique qui relie le taux de la contrainte nominale au gradient de vitesse de déformation \mathbf{G} :

$$\dot{\mathbf{N}} = \mathbf{L} : \mathbf{G} \quad (17)$$

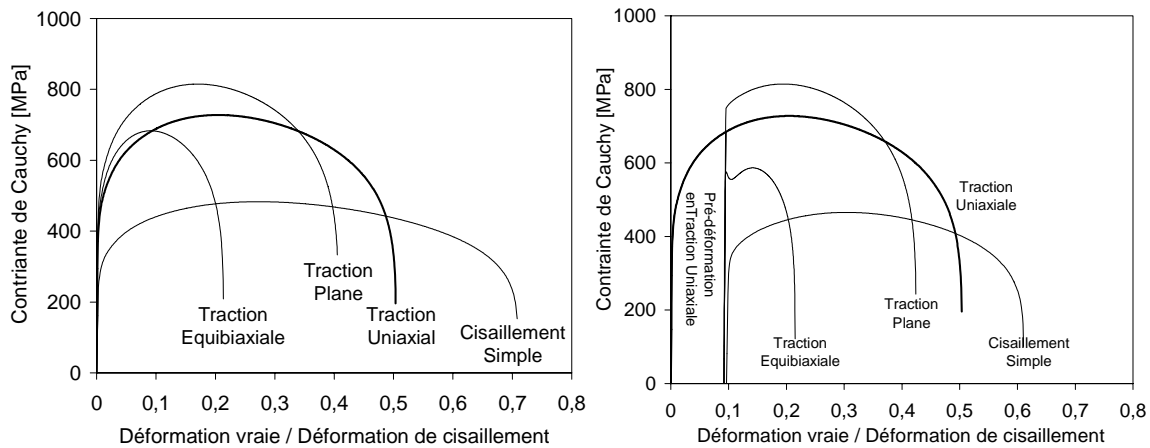


Figure 2. Comportement en trajets directs et séquentiels.

3. APPLICATIONS

Dans cette partie, la capacité de l'approche introduite (comportement et critère) a été testée dans le code Abaqus/Standard. Le comportement a été d'abord étudié en simulant des essais rhéologiques en trajets directs et séquentiels (Figure 2.). Par la suite, le critère de Rice est activé pour permettre de définir les points de la CLF et voir l'influence de la pré-déformation.

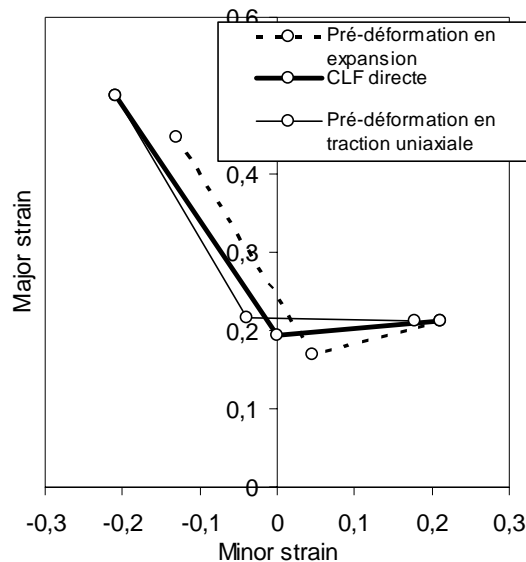


Figure 3. CLF prédites pour des trajets directs et séquentiels.

4. CONCLUSION

Un modèle de comportement complet, décrivant l'écrouissage microstructural, l'endommagement a été combiné à un critère de localisation et implanté au sein du logiciel de calcul Abaqus. La capacité prédictive de cette modélisation a été explorée par la simulation de chargements typiques, proportionnels et séquentiels – ainsi que la simulation de courbes limite de formage. L'implantation réalisée dans le code Abaqus permettra d'appliquer cette modélisation directement en simulation de la mise en forme des tôles métalliques.

REFERENCES

- Haddag, B., Abed-Meraim, F., Balan, T., "Strain localization analysis using large deformation anisotropic elastic-plastic model coupled with damage", *European Journal of Mechanics – A/Solids* (2007). Submitted.
- Lemaitre, J., Chaboche, J.L., "*Mécanique des matériaux solides*", Editions Dunod (1986), Paris.
- Khelifa, K., "Simulation numérique de l'endommagement en formage des structures minces" *Thèse de Doctorat de l'Université de Technologie de Troyes* (2004), France.
- Rice, J.R., "The localization of plastic deformation", *14th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics* (1976), pp. 207-220.
- Rudnicki, J.W., Rice, J.R., "Conditions for the localization of deformation in pressure-sensitive dilatant materials", *J. Mech. Phys. Solids* 23 (6) (1975), pp. 597-605.
- Teodosiu, C., "Large Plastic Deformation of crystalline aggregates", *CISM courses and lectures*, Springer-Verlag (1997), Austria.
- Teodosiu, C., Hu, Z., "Microstructure in the continuum modeling of plastic anisotropy", *19th Riso International Symposium on Materials Science, Proceedings* (1998), Roskilde, pp. 149-168.